

# فعالیت توموگرافی گسیل پوزیترون

گردآوری دکتر حسن قلمی باوئل علیایی  
دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

## اشاره

تا زمانی که با داستان‌های علمی تخیلی به عموم معرفی نشد توجه زیادی به آن نشد. ابتدا «پیش‌تازان فضا» علاقه مردم به پادماده را به واسطه یواس اس که شامل هسته پیچیده ماده پادماده بود جلب کرد. با استفاده از انرژی آزاد شده از نابودی ماده و پادماده، سازمان فضانوردی قادر به کشف جهان بود. بعدها کتاب دن براون<sup>۳</sup> به نام فرشتگان و شیاطین مردم را بیشتر به سمت پادماده سوق داد. در ابتدای کتاب آمده است که شخصی به سازمان اروپایی پژوهش‌های هسته‌ای (CERN) نفوذ کرد تا یک قوطی پادماده را به سرقت ببرد و بعداً از آن به عنوان یک بمب برای از بین بردن واتیکان استفاده کند [۲].

شاگردان با این تصاویر ذهنی و بقیه تصاویر مشهوری که از علم در ذهن دارند وارد کلاس می‌شوند. در حالی که این مثال‌ها دیدگاه متفاوتی از علم را در اختیار آن‌ها قرار می‌دهد، و علاقه آن‌ها را برمی‌انگیزد. این علاقه فرصتی عالی را برای معلمان در ارائه موضوع‌های فیزیک جدید مانند پادماده، پرتوآبی، هم‌ارزی جرم و انرژی و حتی برخورددهنده هادرون در کلاس درس فراهم می‌کند. این موضوع‌ها جرقه‌ای در ذهن شاگردان می‌زند و علاقه به فیزیک را در آن‌ها پرورش می‌دهد. علاوه بر این، به ما اجازه می‌دهد تا به شاگردان نشان دهیم در حالی که ما سامانه‌های دفاعی متشکل از پادماده نداریم، برنامه‌های دنیای واقعی فیزیک پادماده مانند پت‌اسکنر را داریم که دنیای خودمان را با تشخیص تومورها، مناسناز (پخش شدن) سرطان، آلزایمر، و زوال عقل بهتر می‌سازیم. با این برنامه‌ها، شاگردان نمونه‌ای از فیزیک انتزاعی و زیست‌شناسی را در قالب یک دستگاه پزشکی مفید، به هم پیوند می‌دهند.

## پیش‌زمینه

پوزیترون‌ها در فرایند واپاشی بتا<sup>+</sup> تولید می‌شوند. کانال واپاشی  $\beta^+$  به هسته با مقدار بار مثبت اجازه ثبت بیشتر را می‌دهد. وقتی در یک عنصر واپاشی  $\beta^+$  صورت می‌گیرد، یک

این مقاله مقدمه‌ای مختصر درباره پادماده و چگونگی استفاده آن، همراه با دیگر موضوع‌های فیزیک جدید، در اسکن‌های توموگرافی گسیل پوزیترون (PET) را ارائه می‌دهد. همچنین فعالیتی را برای شاگردان ارائه می‌دهد که به آن‌ها در درک چگونگی کمک پت‌اسکنرها در تشخیص سرطان کمک می‌کند. موضوع‌های فیزیک جدید یک راه جالب برای آشنایی شاگردان با برنامه‌های کنونی فیزیک را بیان می‌کند.

کلیدواژه‌ها: توموگرافی، پت اسکن، فرمیون، پادماده

## مقدمه

وجود پادماده اولین بار توسط پل دیراک در سال ۱۹۲۸ مطرح شد. با ترکیب مکانیک کوانتومی و نسبیت خاص، دیراک معادله موج نسبیتی مجزا برای فرمیون‌ها (ذرات بنیادی که تابع قانون پاولی هستند) را بیان کرد، که منجر به نتیجه‌ای شگفت‌آور شد: حل این معادله، نه تنها الکترون دارای بار منفی (که اکنون شناخته شده است)، بلکه الکترون بار مثبت را توضیح می‌دهد. این موضوع باعث شد تا دیراک وجود «پادماده» را پیش‌بینی کند، و منجر به این ادعا شد که برای هر ذره‌ای از ماده، یک ذره پادماده با جرم یکسان اما بار مخالف وجود دارد.

چهار سال بعد وجود پادماده توسط کارل آندرسون<sup>۱</sup>، دانشجوی پسا دکتری در مؤسسه فناوری کالیفرنیا ثابت شد [۱]. آندرسون با استفاده از یک اتاقک ابر، برخی از مسیرهای غیرمعمول پرتوهای کیهانی را شناسایی و مشاهده کرد. این مسیرها ویژگی‌های یکسانی داشتند به طوری که این مسیرها ردهایی را از خود به جا گذاشته بودند، که در جهت مخالف الکترون‌ها خم شده بودند. این موضوع به یک ذره الکترون یا بار مثبت اشاره می‌کرد. بنابراین، آندرسون، پوزیترون، پاد ذره الکترون، را کشف کرد و اولین تأیید پادماده دیراک را ارائه کرد:

با اینکه دانشمندان از کشف پادماده مسحور شده بودند، اما

پروتون به یک نوترون تبدیل می‌شود، سپس در گسیل یک پوزیترون و نوترینو، بارالکتریکی پایسته می‌ماند. پوزیترون به سرعت با یک الکترون ماده معمولی برخورد می‌کند. در این فرایند دو پرتو گاما تولید می‌شود که با انرژی هر یک ۵۱۱ کیلو الکترون ولت در جهت کاملاً مخالف یکدیگر حرکت می‌کنند [۳]. این نابودی یکی از واضح‌ترین نمونه‌های دقیق تبدیل ماده به انرژی است.

در سال ۱۹۵۳، گوردون براونل و ویلیام سویت از نابودی پوزیترون/الکترون برای نشان دادن مغز و تشخیص تومورهای مغزی استفاده کردند [۴]. به بیماران ایزوتوپ پرتوزا تزریق شد که در آن واپاشی  $\beta^+$  صورت می‌گرفت. وقتی ایزوتوپ در بدن حرکت می‌کرد واپاشیده می‌شد و پوزیترون‌ها با الکترون‌های مجاور نابود می‌شدند. پرتوهای گاما گسیل شده از بدن بیمار را آشکارسازهای دو طرف بدن او جذب می‌کرد. این آشکارسازها رویدادی را ثبت می‌کردند که هر دو آشکارساز یک پرتو گاما را در فاصله حدود ۵ میلیاردیم ثانیه از یکدیگر ثبت کنند. با ثبت تعداد کافی رویداد مشاهده شده، یک تصویر فازی از مغز ایجاد شد و براونل و سویت توانستند وجود تومور را تعیین کنند.

این اولین مورد توموگرافی گسیل پوزیترون بود، (پت‌اسکن). در طول سال‌ها، اسکنرها و فناوری تصویربرداری پیچیده‌تر شده است، در حالی که پرتوداروها در اسکن مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما اصول اساسی اسکنرهای PET همچنان یکسان باقی مانده‌اند [۵].

در حالی که اصول فیزیک برای درک چگونگی و چرایی کار آشکارسازها مهم هستند، دانش زیست‌شناسی نیز برای شناخت توانایی پت‌اسکنرها در تشخیص تومورها مهم هستند. نکته کلیدی در سوخت‌وساز سلول است. سلول‌ها از گلوکز ( $C_6H_{12}O_6$ ) برای انرژی استفاده می‌کنند، و سلول‌های متفاوت نیازهای انرژی مختلف را دارند. از آنجا که سلول‌های سرطانی به سرعت رشد می‌کنند و تقسیم می‌شوند، سوخت‌وساز بالاتری نسبت به سلول‌های سالم دارند [۶]. برای استفاده مفید از تفاوت‌های بین سلول‌های سالم و سرطانی، پت اسکن‌ها از مولکول‌های گلوکز که دارای یک فرستنده پوزیترون هستند استفاده می‌کنند.

در حال حاضر، بیشترین کاربرد، مولکول فلئوروکسی گلوکز ( $C_6H_{11}FO_6$ ) است که به‌عنوان  $^{18}F$  FDG نیز شناخته شده است. انتشار پوزیترون در  $^{18}F$  FDG است، ایزوتوپ پرتوزای فلئورو دارای نیمه‌عمر تقریباً ۱۱۰ دقیقه است. تفاوت سوخت‌وساز سلول‌های سرطانی و سالم به این معنی است که سلول‌های سرطانی گلوکز را با سرعت بیشتری نسبت به سلول‌های سالم جذب می‌کنند. این موضوع برای  $^{18}F$  FDG نیز صدق می‌کند. با این حال،  $^{18}F$  FDG قادر به تکمیل مسیر

متابولیک نیست و بنابراین در سلول‌ها به دام می‌افتد. این کار باعث ایجاد FDG در سلول‌های سرطانی می‌شود [۷]. زمانی که فلئور تحت تأثیر واپاشی  $\beta^+$  قرار می‌گیرد، پوزیترون بیشتر اوقات در ناحیه سرطانی منتشر می‌شود. بنابراین، در حالی که آشکار سازها وقایع را در اطراف بدن ثبت می‌کنند، پوزیترون بیشتری در مناطق سرطانی ثبت می‌شود. هنگامی که بسیاری از همپوشانی‌ها در همان منطقه ردیابی می‌شوند نشان دهنده یک تومور است.

در حالی که شبیه‌سازهای زیادی برای نشان دادن چگونگی عملکرد پت‌اسکن وجود دارد، یک فعالیت ساده در کلاس می‌تواند به شاگردان در توانایی تشخیص سرطان توسط پت‌اسکن فهم عمیق‌تری ارائه دهد.

### فعالیت

برای درک بهتر چگونگی عملکرد پت‌اسکنر، به شاگردان یک اسکنر مدل ایجاد شده با استفاده از بورد میکروکنترلر آردوینو، ال‌ای‌دی‌ها، و اتصال پی‌وی سی (شکل ۱) داده شد. علاوه بر اسکنر مدل، به شاگردان یک برگه با یک جدول و یک نمودار که نشان‌دهنده نمای بالا اسکنر است (شکل ۲) داده می‌شود.

اسکنر از قبل به این صورت برنامه‌ریزی شده است تا ال‌ای‌دی‌ها را در فواصل زمانی تعیین شده روشن و خاموش کند. هر اسکنر به‌صورتی برنامه‌ریزی می‌شود تا مکان‌های تومورهای مختلف را با تغییرات جزئی به صورت کد نشان دهد. زمانی که آموزش به اتمام رسید، شاگردان اسکنرهای خود را روشن می‌کنند و به تماشای رویدادهای تصادفی می‌پردازند. همانند یک پت اسکنر واقعی، رویدادهای کاتوره‌ای زمانی ایجاد می‌شود که دو چراغ همان زمان روشن شود. در مدل، این رویدادهای کاتوره‌ای نشان‌دهنده تشخیص دو پرتو گاما تولید شده از رویداد نابودی پوزیترون/الکترون است. این موارد تنها رویدادهایی هستند که شاگردان باید به آن‌ها توجه کنند و علاقه‌مند باشند.

شاگردان تعداد موقعیت چراغ‌هایی که به‌طور همزمان روشن شده‌اند را ثبت می‌کنند، به‌عنوان مثال، اگر چراغ‌های ۱ و ۸ همزمان روشن شوند، آن‌ها ۱ و ۸ را در ستون اول جدول ثبت می‌کنند. آن‌ها اسکنر را تا پایان اسکن نگاه می‌کنند و تمام رویدادها را ثبت می‌کنند. در صورت نیاز، آن‌ها می‌توانند اسکنر را تکرار کنند تا از مشاهده همه رویدادها اطمینان حاصل کنند. شاگردان باید مواردی را که فقط یک چراغ روشن می‌شود را نادیده بگیرند، این موارد نشان‌دهنده تابش پس‌زمینه کاتوره‌ای است که در اسکنر دیده می‌شود. شاگردان باید درک کنند که این تابش‌ها وجود دارند و توسط اسکنر شناسایی می‌شوند، اما فیلترهای الکترونیکی این‌ها را

در حالی که  
اصول فیزیک  
برای درک  
چگونگی و  
چرایی کار  
آشکارسازها  
مهم هستند،  
دانش  
زیست‌شناسی  
نیز برای  
شناخت توانایی  
پت‌اسکنرها  
در تشخیص  
تومورها مهم  
هستند

ترسیم گردید، آن‌ها قادر خواهند بود محل تومور سرطانی را با نگاه کردن به نقطه‌ای که بیشتر خطوط یکدیگر را قطع کرده‌اند تعیین کنند. شکل ۳ یک برگه تکمیل شده را نشان می‌دهد.

برای اینکه مدل واقعی تر باشد، وقایع ثبت شده‌ای که تومور را نشان نمی‌دهند نیز باید در نظر گرفته شوند. این کار به دانشجویان کمک می‌کند تا این موضوع را درک کنند که واپاشی‌های پوزیترون/الکترون منحصر به یک منطقه سرطانی نیست در عوض، آن‌ها در همه جا اتفاق می‌افتند، اما در یک منطقه سرطانی فراوانی بیشتر دارد.

هنگام استفاده از هر مدلی، بسیار ضروری است که مربیان با شاگردان محدودیت‌های آن را به بحث بگذارند. یکی از محدودیت‌های مهم این مدل این نکته است که برای یادآوری مدت کوتاه اسکن و تعداد رویدادهای کاتوره‌ای نیز ثبت شده است. باید به دانشجویان نشان داد که یک پت اسکن معمولی ۱۰ تا ۲۰ دقیقه طول می‌کشد که در آن زمان ده‌ها میلیون رویداد کاتوره‌ای شناسایی و کشف می‌شود. شاگردان همچنین از تصاویر واقعی شکل ۴ و ۵ استفاده بهینه می‌برند.

حذف می‌کنند به‌صورتی که اسکنر تنها بر رویدادهای اصلی تمرکز می‌کند.

هنگامی که شاگردان اطمینان پیدا کردند که همه رویدادهای کاتوره‌ای را ثبت کرده‌اند، هر کدام را بر روی نمودار ترسیم می‌کنند. اگر اولین رویداد ۱، ۸ باشد، شاگردان یک خط را بین موقعیت ۱ و ۸ می‌کشند. آن‌ها همچنان این کار را برای تمام وقایع انجام می‌دهند. زمانی که همه وقایع



شکل ۱. مدل پت اسکن

نام:

هدف: تعیین محل دقیق تومور بیماران با استفاده از مدل پت اسکنر

مسیرها: پت اسکنر تقریباً به مدت یک دقیقه کار می‌کند. با دقت نگاه کنید و جدول زیر را برای ثبت چراغ‌های رویداد پر کنید. اسکن زمانی به پایان می‌رسد که همه چراغ‌ها هم‌زمان چشمک بزنند.

داده‌ها: در جدول ثبت رویدادها ذرات از پت اسکن هم‌زمان شناسایی می‌شوند.

بصری: با استفاده از جدول داده، یک خط بین چراغ‌هایی که در هر اتفاق وجود دارد بکشید تا محل تومور را تعیین کنید.



	اتفاق اول	اتفاق دوم	اتفاق سوم	اتفاق چهارم	اتفاق پنجم
چراغ شماره:					
چراغ شماره:					

شکل ۲. برگه فعالیت

نام:

هدف: تعیین محل دقیق تومور بیماران با استفاده از مدل پت اسکنر

مسیرها: پت اسکنر تقریباً به مدت یک دقیقه کار می‌کند. با دقت نگاه کنید و جدول زیر را برای ثبت چراغ‌های رویداد پر کنید. اسکن زمانی به پایان می‌رسد که همه چراغ‌ها هم‌زمان چشمک بزنند.

داده‌ها: در جدول ثبت اتفاقات، ذرات از پت اسکن هم‌زمان شناسایی می‌شوند.

بصری: با استفاده از جدول داده، یک خط بین چراغ‌هایی که در هر اتفاق وجود دارد بکشید تا محل تومور را تعیین کنید.



	اتفاق اول	اتفاق دوم	اتفاق سوم	اتفاق چهارم	اتفاق پنجم
چراغ شماره:	۱	۹	۴	۲	۱۱
چراغ شماره:	۸	۲	۱۰	۵	۶

شکل ۳. برگه تکمیل شده

#### ← پی‌نوشت‌ها

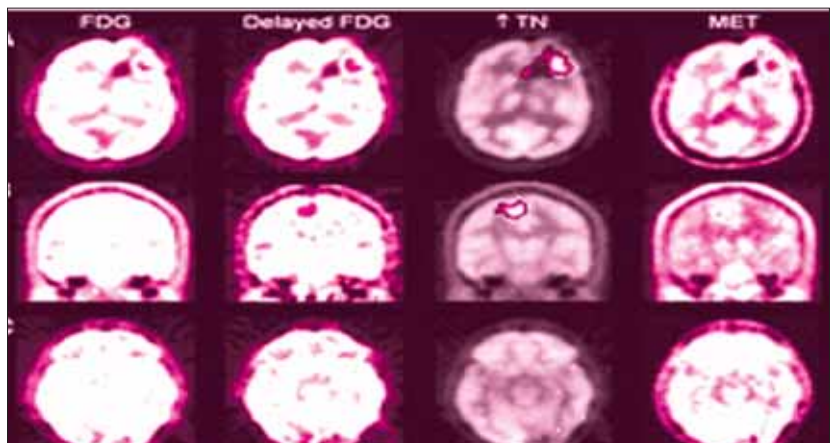
1. Carl David Anderson
2. STAR TREK
3. Dan Brown

#### ← منابع

1. Carl David Anderson, The Discovery of Anti-matter, (World Scientific Publishing, Singapore, 1999), pp. 27–32. Google Scholar
2. Dan Brown, Angels and Demons (Pocket Books, New York, 2000). Google Scholar
3. Syed Naeem Ahmed, Physics & Engineering of Radiation Detection, 1st ed. (Academic Press, San Diego, 2007), p. 78. Google Scholar
4. Leah H. Portnow, David E. Vailancourt, and Michael S. Okun, "The history of cerebral PET scanning," Neurology 80, 952–956 (March 2013). <https://doi.org/10.1212/WNL.0b013e318285c135>, Google ScholarCrossref
5. Gordon L. Brownell, "A history of positron imaging," in Physics Research Laboratory (Massachusetts General Hospital, 1999). Google Scholar
6. R.A Cairns, I. Harris, S. McCracken, and T. W. Mak, "Cancer cell metabolism," Cold Spring Harb. Symp. Quant. Biol. 76, 299–311 (2011). <https://doi.org/10.1101/sqb.2011.76.012856>, Google ScholarCrossref, CAS
7. P. Oehr, H. J. Biersak, and R. E. Coleman, PET and PET-CT in Oncology (Springer-Verlag, Germany, 2004), p. 36. Google ScholarCrossref
8. S. Rossman, US Navy 030819-N-9593R-151, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:US\\_Navy\\_030819-N-9593R-151\\_A\\_patient\\_goes\\_through\\_Positron\\_Emission\\_Tomography\\_\(PET\)\\_at\\_the\\_National\\_Naval\\_Medical\\_Center\\_in\\_Bethesda,\\_Maryland.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:US_Navy_030819-N-9593R-151_A_patient_goes_through_Positron_Emission_Tomography_(PET)_at_the_National_Naval_Medical_Center_in_Bethesda,_Maryland.jpg), accessed May 30, 2017. Google Scholar
9. E. Prieto et al., "Voxel-based analysis of dual-time-point 18F-FDG PET images for brain tumor identification and delineation," J. Nucl. Med. 52, 865–872 (2011). <https://doi.org/10.2967/jnumed.110.085324>, Google ScholarCrossref
10. Readers can view the supplemental documents at TPT Online, <https://doi.org/10.1119/1.5033868> E-PHTEAH-56-008805, under the Supplemental tab. Google Scholar



▲ شکل ۴. بیمار درون دستگاه پتاسکن [۸]



▲ شکل ۵. تصویر پتاسکن مغز تومور را نمایش می‌دهد [۹]. با اجازه مجله فیزیک هسته‌ای

### نتیجه‌گیری

این فعالیت می‌تواند به بحث‌هایی در مورد تعدادی از موضوع‌های فیزیک از جمله ماده، پادماده، پرتوزایی، بیوفیزیک، تشخیص ذرات، هم‌ارزی انرژی-جرم و تابش الکترومغناطیس بینجامد و به مطالب مهندسی، فناوری، محاسبه و ریاضی اشاره‌ای ندارد. علاوه بر این شاگردان چگونگی ترکیب این مفاهیم برای ارائه یک برنامه مهم در دنیای واقعی را احساس می‌کنند. برای بحث بیشتر، معلمان می‌توانند تحقیقات بنیادی فعلی مانند برخورد دهنده هادرونی بزرگ (LHC) در سازمان اروپایی پژوهش‌های هسته‌ای (CERN) را ارائه دهند. دانشمندان در سازمان اروپایی پژوهش‌های هسته‌ای (CERN) در حال حاضر در حال کار بر روی آنچه که از آشکارسازهای برخورددهنده‌های هادرونی بزرگ آموخته‌اند، هستند و از آن در ماشین‌هایی مانند پتاسکن‌ها برای اسکن دقیق‌تر استفاده می‌کنند که به پزشکان این امکان را می‌دهد از مواد پرتوزای کمتری استفاده کنند و نتیجه و تصاویر بهتری را بگیرند. نشان دادن اهمیت تحقیقات بنیادی به شاگردان در حال حاضر بسیار ضروری است، اگر بخواهیم حمایت عمومی از این نوع تحقیق را در آینده داشته باشیم.

### مواد تکمیلی

برای اطلاعات بیشتر در مورد مواد تکمیلی به ساخت مدل پتاسکن، کد نمونه آردوینو، برگه دانشجویی و ویدیو اسکنر مراجعه کنید [۱۰].